مجلّه‌ی جغرافیا و توسعه‌ی ناحیه‌ای، شماره‌ی هفتم، پاییز و زمستان ۱۳۸۵

مهدی آسیایی
پژوهشکده‌ی اقلیم‌شناسی مشهد

پایش خشکسالی در مشهد

–با استفاده از شاخص خشکسالی پالمر–

چکیده

خشکسالی پدیده‌ای اقلیمی بوده و به‌عنوان بخشی از اقلیم یک منطقه محسوب می‌شود. این پدیده دارای خصوصیّاتی است،که آن را از سایر بلایای طبیعی جدا می‌کند. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که در بین حوادث طبیعی، خسارات ناشی از خشکسالی بیشترین مقدار را شامل است. لذا پایش گسترده آن و ایجاد یک نظام هشدار و پیش‌آگاهی در مناطق مستعدّ خشکسالی، امری اجتناب ناپذیر است. یکی از ابزارهای اصلی پایش خشکسالی، استفاده از شاخص‌های خشکسالی می‌باشد. نوشتار حاضر، شاخص شدّت خشکسالی پالمر را به عنوان الگوی معتبر و کاربردی، مورد استفاده قرار داده است. پارامترهای اصلی ورودی، شامل: بارندگی(P)، درجه حرارت(T) و مقدار آب قابل دسترس(AWC) است. در هر دوره، تبخیر– تعرّق پتانسیل با استفاده از اطّلاعات به‌دست آمده بر اساس الگوی دو لایه‌ای ذخیره‌ی رطوبت خاک محاسبه می‌شوند. در پایان نتایج خروجی الگو، که شاخص انحراف رطوبت ماهانه (Z) و شاخص شدّت خشکسالی(X_i) می‌باشد، ارائه می‌شود. در این مقاله با استفاده‌از نرم افزاری که جهت محاسبه شاخص شدّت خشکسالی پالمر طرّاحی شده، این شاخص برای ایستگاه سینوپتیک مشهد طیّ دوره‌ی آماری(۲۰۰۳–۱۹۷۱ میلادی) محاسبه و ارائه گردیده است.

واژه‌های کلیدی: خشکسالی، شاخص خشکسالی، شاخص شدّت خشکسالی پالمر، درجه‌ی حرارت، بارندگی.

۱. درآمد:

خشکسالی بلیّه‌ای است که از نبود آب (بارندگی) ناشی می‌شود و نبود آن به معنای نابودی حیات است(آسیایی، مهدی، ۱۳۸۳: ۷۱). دانش بشری هنوز به آن اندازه توسعه نیافته که راهکارهای مناسبی جهت رفع

کمبود بارندگی یابد و از این رو پیش‌آگاهی و پیش‌بینی‌های دوره‌های خشک مهمترین رهکار در جلوگیری از بروز خسارات این پدیده‌ی زیان‌بخش است. هرچند این پیش‌بینی‌ها دقیق‌تر و فواصل زمانی آن طولانی‌تر باشد، ابعاد بحران محدودتر شده و برآورد و جبران خسارات ساده‌تر می‌شود. خشکسالی به عنوان یکی از پیچیده‌ترین بلایای طبیعی، پدیده‌ای خزنده به شمار می‌رود (آسیایی، مهدی،۱۳۸۴: ۲۰). تداوم وقوع آن طولانی بوده و اثرات ناشی از آن حالت غیرساختاری داشته و در نتیجه خسارت‌های ناشی از این پدیده در بخش‌های مختلف، مانند کشاورزی، اجتماعی و غیره، به صورت تدریجی ظاهر می‌شود. نکته‌ی دارای اهمیّت این است که خسارات و اثرات ناشی از خشکسالی برابر یا بیشتر از خسارات ناشی از سایر بلایای طبیعی مثل سیل و زلزله می‌باشد (ویلهایت،۲۰۰۰: ۲۵۰) . همچنین به دلیل طبیعت و ذات پنهانی این پدیده، تعیین زمان آغاز، گسترش و پایان آن بسیار دشوار است. این مسأله اهمیّت پایش گسترده و یا ایجاد یک نظام هشدار و پیش‌آگاهی را در مناطق مستعدّ خشکسالی نشان می‌دهد. در این راستا استفاده از داده‌های ماهواره‌ای به منظور انجام پایش خشکسالی، همچنین کاربرد شاخص‌های خشکسالی در خلاصه‌سازی بسیاری از پارامترهای مؤثّر در خشکسالی در سطوح مختلف برای برنامه‌ریزان مفید است. با استفاده از شاخص‌های خشکسالی می‌توان شدّت و وسعت خشکسالی را کمّی نموده و آن را به صورت دوره‌ای ارزشیابی کرد (آسیایی، مهدی، ۱۳۸۵: ۲۹). به‌طور کلّی، شاخص‌های متعددی برای ارزشیابی خشکسالی به‌کار برده می‌شوند، که از آن جمله می‌توان به شاخص‌های زیر اشاره نمود:

- شاخص درصد نرمال[1] (PN)؛
- شاخص استاندارد بارش[2] (SPI)؛
- شاخص شدّت خشکسالی پالمر[3] (PDSI)؛
- شاخص دهک‌ها[4]؛
- شاخص خشکسالی بالم و مولی[5] (BMDI)؛
- شاخص خشکسالی احیایی[1] (RDI)؛

1. Percent of Normal
2. Standardized Precipitation Index
3. Palmer Drought Severity Index
4. Deciles
5. Bahlme and Mooley Drought Index

شاخص اندیس گیاهی[2] (NDVI)؛

شاخص بارش مؤثّر[3] (EPI).

هر یک از این شاخص‌ها فقط برای کاربردهای خاص در منطقه‌ی خاصّی معتبر اند، که علّت آن متغیّر بودن شرایط هواشناختی مؤثّر بر ایجاد پدیده‌ی خشکسالی از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر است (جوانمرد، ۱۳۸۰: ۱۰). ولی برای مناطقی که دارای شرایط اقلیمی یکسانی هستند، می‌توان از شاخص‌های خشکسالی یکسانی استفاده نمود. در خصوص مقایسه‌ی شاخص PDSI و SPI و همچنین مزایا و محدودیّت‌های آن می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: نمایه‌ی SPI فقط بر اساس بارندگی محاسبه می‌شود، در حالی که محاسبه‌ی PDSI ،مستلزم آن است که ۶۸ اصطلاح را در آن تعریف کنیم. همچنین نمایه‌ی SPI برخلاف PDSI، به شرایط رطوبت خاک بستگی ندارد، بنابراین می‌توان از آن برای ماه‌های زمستان نیز استفاده کرد. همچنین از توپوگرافی نیز تأثیر نمی‌پذیرد. از محدودیّت‌های نمایه‌ی SPI، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. صحّت و اعتبار SPI، به اندازه‌ی صحّت و اعتبار داده‌های مورد استفاده است؛

۲. قبل از استفاده از SPI برای یک ایستگاه، اطّلاعاتی درباره‌ی اقلیم ناحیه موردنیاز است(ویلهایت، ۲۰۰۰: ۲۵۰).

اما نمایه‌ی پالمر یکی از روش‌های بسیار مؤثّر در تعیین خشکسالی طولانی‌مدّت (چندماهه) می‌باشد، ولی به عنوان پیش‌بینی کوتاه‌مدت (چند هفته) جواب خوبی نمی‌دهد.

یکی از مهمترین امتیازات نمایه‌ی پالمر آن است که نسبت به شرایط اقلیم محلّی استاندارد است، بنابراین می‌تواند در هر بخش از کشور جهت نشان دادن خشکسالی نسبی یا ترسالی مورد استفاده قرار گیرد(آسیایی، ۱۳۸۵: ۵۰).

1. Reclamation Drought Index
2. Normalized Drought Vegetation Index
3. Effective Precipition Index

۲. شاخص شدّت خشکسالی پالمر

پالمر[1] شاخص خشکسالی خود را، که ترکیبی از بارندگی رخ داده، ذخیره‌ی رطوبتی و نیاز رطوبتی است، براساس محاسبه‌ی بیلان آبی معرّفی نمود. او از یک الگوی دولایه‌ای برای محاسبات رطوبت خاک استفاده کرد و فرضیّه‌ی ویژه‌ای در ارتباط با ظرفیّت پذیرش و انتقال رطوبت به لایه‌های مختلف خاک ارائه داد. پالمر شروع و پایان دوره‌ی خشکسالی و ترسالی برحسب احتمال زمان شروع و پایان آن را بیان کرد. یک دوره‌ی خشکسالی و یا ترسالی وقتی به‌طور قطع اتفاق می‌افتد که این احتمال به ۱۰۰٪ رسیده یا از آن فراتر رود. امّا دوره‌ی خشکسالی یا ترسالی وقتی ماه اوّل خود را به اتمام می‌رساند که این احتمال از صفر بزرگتر بوده و همچنان بالای صفر بماند تا به ۱۰۰٪ برسد. این شاخص خشکسالی هواشناسی به نام PDSI یا شاخص شدّت خشکسالی پالمر نامیده می‌شود (پالمر،۱۹۶۵: ۵۸). این فرآیند برگشتی[2] پایان دوره‌ی خشکسالی یا ترسالی نمی‌تواند به نحو شایسته‌ای برای محاسبات بهنگام شاخص شدّت خشکسالی پالمر مورد استفاده قرار گیرد، زیرا مشخص نیست که در چند ماه آینده شاهد آغاز یک دوره‌ی خشکسالی هستیم یا ترسالی؟ و یا این‌که با توقّف دوره‌ی خشکسالی جاری یا ترسالی روبروهستیم. این الگوی اندیس (X_1) را برای خشکسالی جاری (رخ داده) و اندیس (X_3) را برای دوره ترسالی در حال شروع محاسبه می‌کند. محاسبات مشابهی را نیز برای ترسالی جاری (X_2) و خشکسالی در حال شروع (X_3) انجام می‌دهد. براساس احتمال این‌که کدامیک از دوره‌های خشکسالی یا ترسالی در حال اتمام باشد،الگوی X_1، X_2 یا X_3 را برای محاسبه‌ی PDSI انتخاب می‌کند. سرویس ملّی هواشناسی آمریکا[3] (NWS) این الگو را با یک الگوی تعمیم‌یافته‌ی PDSI در سال ۱۹۹۰ میلادی تلفیق نمود. این الگوی تعمیم‌یافته اجازه می‌دهد تا PDSI از طریق جمع احتمال وقوع خشکسالی و ترسالی(P و P ـ ۱۰۰)، که در آن P احتمال وقوع پدیده‌ای است که دوره آن پایان می‌یابد، به‌دست آید. از همان ابتدا شاخص پالمر به‌عنوان «یک روش مناسب برای تلفیق بارندگی و دما به‌عنوان یک متغیّر پیش‌بینی» شناخته شد. شاخص پالمر به‌طور گسترده در ایالات متحده‌ی آمریکا مورد استفاده قرار گرفت و پس از تعمیم آن به سایر مناطق جهان، نتایج آن با هم تلفیق گردید(گوگان،۱۹۹۵: ۶۸-۶۵۵).

1. Palmer
2. Back-stepping
3. Nation Weather Service

در این مقاله پس از معرّفی شاخص شدّت خشکسالی پالمر (PDSI) به عنوان الگوی معتبر و کاربردی، به منظور کاربرد شاخص شدّت خشکسالی پالمر در ارزشیابی خشکسالی‌های خراسان در پژوهشکده‌ی اقلیم‌شناسی نرم‌افزار خاصّی طرّاحی گردیده است، که ضمن بیان عوامل مؤثّر در محاسبات و روابط ریاضی حاکم بر آنها، طرح واره‌ی محاسبه‌ی این شاخص نیز ارائه می‌شود. مفاهیم اساسی و روش محاسبه‌ی شاخص شدّت خشکسالی پالمر به همراه نمونه‌ی محاسبات انجام شده برای مشهد طیّ دوره‌ی آماری ۲۰۰۳-۱۹۷۱ میلادی بیان می‌شود.

۳. موادّ و روش‌ها

در این مطالعه از داده‌های ایستگاه سینوپتیک مشهد استفاده شده است. شاخص PDSI، بر اساس داده‌های بارش و دما و نیز مقادیر رطوبت در دسترس خاک (AWC)[1] محاسبه می‌شود. از میان ورودی‌های محاسباتی تمامی کمیّت‌های اصلی معادله‌ی بیلان آبی، نظیر تبخیر- تعرّق، تغذیه‌ی خاک، رواناب و تلفات رطوبتی از لایه‌ی سطحی قابل تعیین و محاسبه است (میلر، ۱۹۹۴: ۴۴). البته اثرات فعالیّت‌های انسانی بر این موازنه (بیلان) نظیر آبیاری ـ در نظر گرفته نشده است. PDSI صرفاً شاخص هواشناسی نیست، بلکه بیشتر به آن شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی پالمر (PHDI) [2]گفته می‌شود. چرا که مبنای آن وضعیّت رطوبتی فعلی (بارش)، جریانات خروجی و ذخیره‌ی رطوبت بوده و روندهای درازمدّت را لحاظ می‌نماید(گاتمن،۱۹۹۱: ۶۷). پالمر شاخص PDSI را جهت ردیابی و نشان‌دادن تأثیر دوره‌های مداوم خشکسالی (یا دوره‌های ترسالی) در شاخص‌های خشکسالی معرّفی نمود. دلیل و انگیزه‌ی او برای تدوین شاخص بالا این بود که وجود یک ماه مرطوب در میانه‌ی خشکسالی درازمدّت اثر مهمی بر جای نمی گذارد، به عبارت دیگر یک سری ماهها با بارندگی نزدیک به نرمال پس از یک خشکسالی جدّی به معنای پایان خشکسالی نیست. جدول(۱) درجه‌بندی شاخص شدّت خشکسالی پالمر را نشان می‌دهد که از شرایط بسیار زیادتر تا بسیار زیاد خشک را شامل می‌شود. عوامل مؤثّر در محاسبه و ارزشیابی و طرح واره‌ی شاخص شدّت خشکسالی پالمر به ترتیب در جدول(۲) و شکل(۱) ارائه شده است.

1. Available Water Content
2. Palmer Hydrological Drought Index

جدول (۱) طبقه‌بندی خشکسالی بر اساس شاخص PDSI

درجه‌ی خشکسالی	ارزش PDSI
ترسالی بسیار شدید	۴ یا بیشتر
بسیار مرطوب	۳ تا ۳/۹۹
ترسالی متوسط	۲ تا ۲/۹۹
تقریباً مرطوب	۱ تا ۱/۹۹
تا حدّی مرطوب	۰/۵ تا ۰/۹۹
تقریباً نرمال	۰/۴۹ تا ۰/۴۹-
تا حدّی خشک	۰/۵- تا ۰/۹۹-
خشکسالی خفیف	۱- تا ۱/۹۹-
خشکسالی متوسط	۲- تا ۲/۹۹-
خشکسالی شدید	۳- تا ۳/۹۹-
خشکسالی بسیار شدید	۴- یا کمتر

جدول (۲) تجزیه و تحلیل عوامل مؤثّر در محاسبه و ارزشیابی شاخص شدّت خشکسالی پالمر

پارامتر	محاسبه‌ی پارامتر	توضیح
P	Precip. (in.)	بارندگی ماهانه (.in)
T	Temp. (°F)	دمای متوسط ماهانه (F)
PE	Pot. Evapotr.	تبخیر وتعرّق پتانسیل ماهانه (روش تورنت وا یت)
P-PE		تبخیر و تعرّق -بارندگی
ΔS_S	Sfc. moist chg.	تغییرات رطوبت خاک در سطح
S_S	Sfc. Moist	مقدار رطوبت موجود در لایه‌ی سطحی خاک در پایان ماه (.in)
ΔS_u	Subsil moist. chg.	تغییرات رطوبت خاک زیرین
S_u	Subsoil moist.	مقدار رطوبت موجود در خاک زیرین در پایان ماه (in)

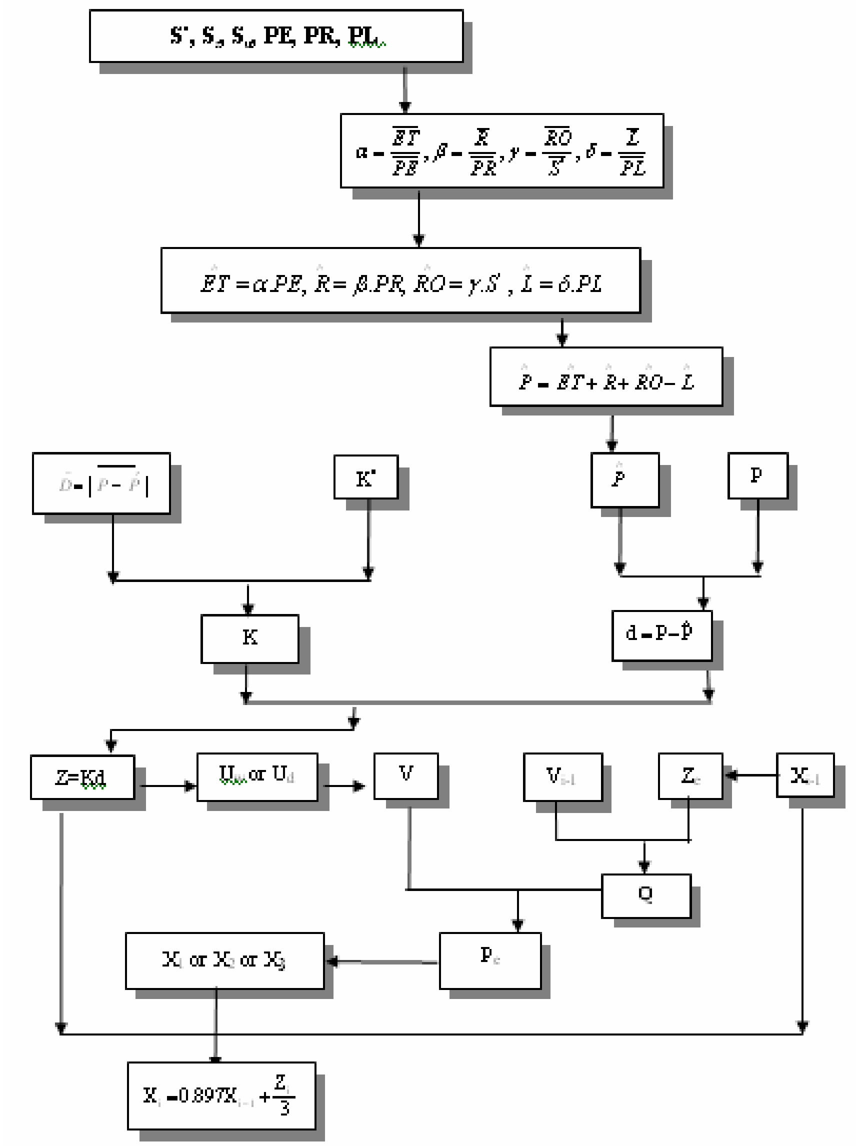
پارامتر	محاسبه پارامتر	توضیح
S'	Initial moist	رطوبت اوّلیه‌ی خاک
PR	Pot. recharge	پتانسیل تجدید رطوبت؛ مقدار اینچ رطوبت مورد نیاز برای رسیدن به ظرفیت مزرعه در ابتدای ماه
R	Moist. recharge	ذخیره‌ی مجدّد ماهانه، رطوبت دریافتی خالص درلایه‌ی زیرین و سطحی خاک
L	Moist. loss	اتلاف رطوبت ماهانه از لایه‌ی زیرین و سطحی خاک
ET	Evapotr.	تبخیر وتعرق حقیقی ماهانه
RO	Runoff	رواناب ماهانه
PL	Pot. Moist loss	پتانسیل کاهش آب ماهانه، مقدار اینچ رطوبت مورد نیاز برای رسیدن به نقطه‌ی پژمردگی مزرعه در ابتدای ماه
α	$\overline{\mathbf{ET}} / \overline{\mathbf{PE}}$	ضریب تبخیر (برای دوره‌ی آماری ۳۰ساله)
β	$\overline{\mathbf{R}} / \overline{\mathbf{PR}}$	ضریب تجدید رطوبت (برای دوره‌ی آماری ۳۰ ساله)
γ	$\overline{\mathbf{RO}} / \overline{\mathbf{S'}}$	ضریب رواناب (برای‌دوره‌ی آماری ۳۰ ساله)
δ	$\overline{\mathbf{L}} / \overline{\mathbf{PL}}$	ضریب کاهش رطوبت (برای دوره‌ی آماری ۳۰ ساله)
$\hat{\mathbf{ET}}$	α .PE	تبخیر و تعرّق برآوردی ماهانه
$\hat{\mathbf{R}}$	β .PR	تجدید رطوبت خاک برآوردی ماهانه
$\hat{\mathbf{RO}}$	$\gamma S'$	رواناب برآوردی ماهانه
$\hat{\mathbf{L}}$	δPL	اتلاف رطوبت خاک برآوردی ماهانه
$\hat{\mathbf{P}}$	$\hat{\mathbf{ET}} + \hat{\mathbf{R}} + \hat{\mathbf{RO}} - \hat{\mathbf{L}}$	بارندگی ماهانه برآوردی
D	$\mathbf{P} - \hat{\mathbf{P}}$	انحراف ماهانه در یک ماه معیّن
K	Weight factor	عامل توزینی
Z	Kd	نمایه‌ی انحراف رطوبت
U_W	Z+0.15	مقدار تری مؤثّر در پایان دوره‌ی خشک
U_d	Z–0.15	مقدار خشکی مؤثّر درپایان دوره‌ی مرطوب
V	ΣU	مقادیر تجمعی U_w یاخشکی U_d
Z_e	$-2.691 X_{i-1} \pm 1.50$	نیاز غیر معمول به رطوبت برای پایان دادن یک پدیده دریک ماه
Q	Z_e+V_{i-1}	
P_e	V/Q	
Z/3		
X	Final index	شاخص شدّت خشکسالی (یا ترسالی) بدون علامت می‌باشد

روش محاسبه‌ی PDSI

داده‌های اندازه‌گیری شده بارش و دمای هوا به صورت ماهانه ورودی اصلی این برنامه است. طرّاحی این نرم‌افزار به گونه‌ای است که اطّلاعات ورودی سازگار با سیستم متداول کشور باشد و تبدیل واحدها در طول اجرای برنامه به‌صورت خودکار انجام شود. عرض جغرافیایی محل (φ) و ظرفیّت قبول آب خاک (AWC) منطقه‌ی مورد مطالعه از دیگر ورودی‌های این برنامه است. همان‌گونه که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، ورود اطّلاعات به سیستم در همان چهار ستون اولیّه انجام می‌شود. تعیین وضعیّت رطوبت خاک،که مبنای محاسبات بعدی در تعیین PDSI است،با استفاده از معادله‌ی بیلان آبی تورنت‌ویت انجام می‌شود. لذا پس از ورود اطّلاعات بارندگی، دما، عرض جغرافیایی و ظرفیّت قبول آب خاک (جدول ۳) محاسبات با تعیین تبخیر ـ تعرّق ماهانه‌به روش تورنت‌وایت آغاز می‌شود.(تورنث وایت، ۱۹۵۵: ۳۴۶).

جدول (۳) ورود اطّلاعات و محاسبه‌ی تبخیر- تعرّق به منظور محاسبات PDSI

YEAR	Month	P (mm)	T (c)	Lat	i	Alfa	ETP(mm)
	Jan	۳۰/۱	۳/۷	۳۶/۵	۰/۶۲	۱/۷	۳۶
	Feb	۳۰/۷	۶/۲	۳۶/۵	۱/۳۸	۱/۷	۹/۱
	Mar	۳۵/۷	۹/۴	۳۶/۵	۲/۵۸	۱/۷	۲۳/۰
	Apr	۶۱/۴	۱۵/۱	۳۶/۵	۵/۳۰	۱/۷	۵۵/۷
	May	۴۰/۲	۱۸/۲	۳۶/۵	۷/۰۴	۱/۷	۸۶/۰
	Jun	۰/۲	۲۴/۱	۳۶/۵	۱۰/۷۸	۱/۷	۱۳۹/۳
2003	Jul	۰	۲۸/۵	۳۶/۵	۱۳/۹۱	۱/۷	۱۸۸/۳
	Aug	۰	۲۶/۲	۳۶/۵	۱۲/۲۴	۱/۷	۱۵۳/۱
	Sep	۰	۲۱/۴	۳۶/۵	۹/۰۴	۱/۷	۹۷/۴
	Oct	۱/۴	۱۸/۳	۳۶/۵	۷/۱۰	۱/۷	۷۰/۶
	Nov	۴۷	۸/۸	۳۶/۵	۲/۳۵	۱/۶	۱۸/۹
	Dec	۱۴/۷	۴/۳	۳۶/۵	۰/۷۸	۱/۷	۵/۴



شکل(۱) طرح واره‌ی محاسبه‌ی شاخص خشکسالی پالمر

پارامترهای جدول شماره(۳) به شرح زیر است:

P: بارندگی به میلی‌متر.

T: درجه‌ی حرارت به سانتی گراد.

Lat: عرض جغرافیایی.

I: شاخص حرارت ماهانه بوده، که از رابطه‌ی زیر برای هر ماه قابل محاسبه است.

$$i = (Ti / 5)^{1.514} \quad (۱)$$

ETP: برای محاسبه این پارامتر از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود:

$$ETP = 1.6\ (10Ti/I)\alpha \quad (۲)$$

در این رابطه

T: درجه‌ی حرارت،

I : شاخص حرارتی سالانه که مجموع شاخص‌های حرارتی ماهانه بوده و از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$I = \sum_{i=1}^{12} (Ti / 5)^{1.514} = \sum_{i=1}^{12} i \quad (۳)$$

α: از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha = 0.000000675\ I^3 - 0.0000771\ I^2 + 0.01792\ I + 0.49239 \quad (۴)$$

پس از برآورد پتانسیل تبخیر ـ تعرّق ماهانه، تبدیل داده‌های درجه‌ی حرارت از مقیاس سانتی گراد به فارنهایت (Tf) و محاسبه‌ی میانگین ماهانه‌ی دما (Avg T) در جدول (۴) ادامه می‌یابد. آن‌گاه داده‌های بارش ماهانه به اینچ (Pin) تبدیل شده و میانگین ماهانه‌ی این پارامتر نیز محاسبه می‌شود. مشابه این عملیّات در مورد تبخیر ـ تعرّق پتانسیل هم اجرا می‌شود. در ستون بعدی از جدول (۴) تفاوت بارندگی و تبخیر ـ تعرّق پتانسیل ماهانه (P-PE)محاسبه می‌شود که مبنای محاسبه‌ی بیلان آبی و برآورد مقدار و تغییرات محتوی آب است (ΔSs, ΔSu, Ss, Su) و در آخرین ستون جدول(۴) مقدار کل رطوبت موجود خاک (S) در انتهای ماه محاسبه می‌شود.

جدول (۴) محاسبه و تعیین بیلان آبی و رطوبت خاک

YEAR	Month	T (f)	Avg T	P(in)	Avg p	PE	AvgPE	P -PE	ΔSs	ΔSu	Ss	Su	S
	Jan	38.57	34.6	1.19	1.5	0.14	0.1	1.04	0.27	0.77	1.00	0.81	1.81
	Feb	43.16	36.4	1.21	1.7	0.36	0.2	0.85	0.00	0.85	1.00	1.66	2.66
	Mar	48.83	46.5	1.41	2.3	0.91	0.9	0.50	0.00	0.50	1.00	2.16	3.16
	Apr	59.09	59.0	2.42	1.8	2.19	2.4	0.22	0.00	0.22	1.00	2.38	3.38
	May	64.67	66.8	1.58	1.0	3.38	4.0	-1.80	-1.00	-0.19	0.00	2.19	2.19
	Jun	75.29	75.9	0.01	0.2	5.48	5.7	-5.48	0.00	-1.20	0.00	0.99	0.99
2003	Jul	83.21	80.0	0.00	0.0	7.41	6.7	-7.41	0.00	-0.74	0.00	0.26	0.26
	Aug	79.07	76.5	0.00	0.0	6.03	5.6	-6.03	0.00	-0.15	0.00	0.10	0.10
	Sep	70.52	68.0	0.00	0.1	3.84	3.6	-3.84	0.00	-0.04	0.00	0.06	0.06
	Oct	64.85	57.1	0.06	0.3	2.78	1.9	-2.73	0.00	-0.02	0.00	0.05	0.05
	Nov	47.84	49.1	1.85	0.5	0.74	0.9	1.11	1.00	0.11	1.00	0.15	1.15
	Dec	39.65	39.2	0.58	1.1	0.21	0.3	0.36	0.00	0.36	1.00	0.52	1.52

پارامترهای جدول شماره(۴) به شرح زیر است:

PE: تبخیر و تعرّق پتانسیل اصلاح نشده بر حسب میلی‌متر که از روش تورنت وایت به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$PE_X = 16(\frac{10t}{I})^A \quad (۵)$$

در این رابطه:

T: متوسط درجه‌ی حرارت در ماه مورد نظر بر حسب سانتی گراد

I: نمایه‌ی حرارتی سالانه است که از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است

$$I = (\frac{t_n}{5})^{1.514} \quad (۶)$$

t_n: متوسط ماهانه‌ی درجه‌ی حرارت برحسب سانتی گراد است

A: ضریبی است که به نمایه‌ی حرارتی سالانه بستگی دارد و مقدار آن از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود

(۷) $a= (675*10^{-9}) I^3 - (771*10^{-7}) I^2 + (179*10^{-4}) I+0.492$

PE: تبخیر و تعرّق اصلاح شده نیز از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است

$$PE = PE \times (\frac{DN}{360}) \quad (۸)$$

در این رابطه:

D: متوسط تعداد ساعات بین طلوع و غروب در ماه مورد نظر

N: تعداد روزها در ماه مورد نظر

ΔSs: تغییرات رطوبت خاک سطحی

ΔSu: تغییرات رطوبت خاک زیرین

Ss: رطوبت قابل دسترسی در سطح خاک در انتهای ماه است که عبارت است از مقدار رطوبت خاک که با کسر نقطه‌ی پژمردگی از مقدار رطوبت موجود به‌دست می‌آید

(۹) **Ss**=رطوبت خاک در پایان ماه - P.W.P

Su: رطوبت قابل دسترس در لایه‌ی زیرین خاک در انتهای ماه است که از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است

(۱۰) $Ss_{[30-50cm]}$=رطوبت خاک در پایان ماه$_{[30-50cm]}$ - P.W.P

S: رطوبت اولیّه‌ی خاک در ابتدای ماه است که این مقدار با استفاده از روش وزنی با نمونه برداری و یا شیوه‌های غیرمستقیم قابل اندازه گیری است.

در جدول(۵) پس از ستون‌های مربوط به سال و ماه، پتانسیل تجدید رطوبت ماهانه[1] (PR) که مقدار اینچ رطوبت مورد نیاز برای رسیدن به ظرفیّت زراعی خاک در ابتدای ماه است، محاسبه و میانگین گیری می‌شود. در ستون بعد ذخیره‌ی مجدّد ماهانه‌ی رطوبت در خاک (R) که مقدار دریافتی خالص آب در لایه‌ی سطحی و زیرین خاک است، با استفاده از معادله‌ی بیلان آب تعیین می‌شود. در ستون‌های بعدی جدول (۵) پتانسیل

1. Pot. Recharge

کاهش آب ماهانه[۱] (PL) که مقدار آبی است که می‌توانـد از خـاک تبخیـر شـود و اتـلاف رطوبـت از لایـه‌ی سطحی و زیرین خاک طیّ ماه مورد نظر[۲] (L) برآورد می‌شود و بـه ایـن ترتیـب مقـدار تبخیـر ـ تعـرّق حقیقـی ماهانه[۳] (ET) با استفاده از مقادیر بارندگی و تغییرات محتوی آب خاک در طول مـاه قابـل انـدازه‌گیـری اسـت. همچنین با فرض این‌که مقادیر بارندگی بیشتر از حدّ ظرفیّت زراعی خاک به رواناب[۴] (RO) تبـدیل مـی‌شـود، مقادیر ماهانه‌ی رواناب برآورد می‌شود. همچنین در جدول (۵) چهـار پـارامتر مهـم بـرای محاسـبه‌ی بارنـدگی برآوردی نیز تعیین شده است. این پارامترها ($\gamma, \delta, \beta, \alpha$) به صورت ضرایب ثابت برای هر یک از ماه‌های سال با روابط ویژه تعیین می‌شود. میزان بارندگی فرضی ($\hat{P}$) برای هر ماه از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

جدول (۵) محاسبات اتلاف و تجدید رطوبت خاک و تعیین ضرایب ثابت معادله پالمر

YEAR	Month	PR	Avg PR	R	PL	Avg PL	L	ET	RO	α	β	γ	δ
	Jan	5.23	4.8	1.04	0.14	0.1	0.00	0.14	0.0	1.60	0.28	0.0	0.07
	Feb	4.19	3.5	0.85	0.36	0.2	0.00	0.36	0.0	1.87	0.39	0.1	0.00
	Mar	3.34	2.1	0.50	0.91	0.5	0.00	0.91	0.0	1.71	0.38	0.2	0.09
	Apr	2.84	1.4	0.22	0.26	0.7	0.00	2.19	0.0	1.01	0.05	0.1	1.00
	May	2.62	2.0	0.00	0.74	1.0	1.19	2.77	0.0	0.57	0.00	0.0	1.15
	Jun	3.81	3.2	0.00	0.54	0.7	1.20	1.21	0.0	0.30	0.00	0.0	2.07
2003	Jul	5.01	4.7	0.00	0.19	0.3	0.74	0.74	0.0	0.13	0.00	0.0	2.92
	Aug	5.74	5.6	0.00	0.06	0.1	0.15	0.15	0.0	0.05	0.00	0.0	2.14
	Sep	5.90	5.8	0.00	0.02	0.0	0.04	0.04	0.0	0.05	0.00	0.0	1.49
	Oct	5.94	5.9	0.00	0.01	0.0	0.02	0.07	0.0	0.19	0.00	0.0	1.03
	Nov	5.95	5.9	1.11	0.74	0.0	0.00	0.74	0.0	0.43	0.02	0.0	0.32
	Dec	4.85	5.8	0.36	0.21	0.2	0.00	0.21	0.0	0.87	0.16	0.0	0.00

1. Pot. Moist. Loss
2. Moist. Loss
3. Evapotranspiration
3. Permanent wilting point
4. Runoff

پارامترهای جدول شماره(۵) به شرح زیر است:

PR: مقدار رطوبت مورد نیاز برای رسیدن به ظرفیّت مزرعه در ابتدای ماه که بر حسب اینچ است و از طریق رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

F.C =PR (ظرفیت نگهداری)- رطوبت خاک در ابتدای ماه (۱۱)

R: افزایش رطوبت ماهانه که از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

متوسط رطوبت ابتدای ماه– متوسط رطوبت در انتهای ماه =R (۱۲)

L: اتلاف رطوبت ماهیانه از لایه‌ی زیرین و سطحی خاک که از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود

متوسط رطوبت خاک در ابتدای ماه– متوسط رطوبت خاک در انتهای ماه=L (۱۳)

PL: پتانسیل کاهش آب ماهانه، مقدار اینچ رطوبت مورد نیاز برای رسیدن به نقطه‌ی پژمردگی مزرعه در ابتدای ماه

ET: مقدار تبخیر ـ تعرّق حقیقی است که از تأثیر ضریب گیاهی Kc در مقدار تبخیر و تعرّق پتانسیل به‌دست می‌آید، این ضریب معمولاً کمتر از یک و بین ۱/۱۵–۰/۲۵ می‌باشد.

تبخیر و تعرق واقعی$=PE\times K_c$

تبخیر و تعرق واقعی ماهیانه $ET=\sum_{i=1}^{31} ET_i$ (۱۴)

RO: رواناب ماهیانه است که از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود

(۱۵) $P-PR=Ro_i$

در این رابطه: P بارندگی بر حسب اینچ، PR قبل از بارندگی بر حسب اینچ

$Ro=\sum_{i=1}^{31} Ro_i$ (۱۶)

برای محاسبه‌ی این مقادیر δ ، γ ، β ، α ،از جدول شماره(۵) از رابطه‌ی کلّی زیر استفاده می‌شود:

$$\hat{P}=\alpha PE+\beta PR+\delta PRO-\delta PL \quad (۱۷)$$

بارندگی فرضی مقدار بارشی است که لازم است در یک ماه ببارد تا میزان تبخیر ـ تعرّق، رواناب و ذخیره‌ی رطوبت خاک با توجه به وضعیّت رطوبت خاک در انتهای ماه قبل در حدّ نرمال اقلیم مورد نظر باقی بماند. ضرایب به کار رفته در محاسبه ($\hat{P}$) به شکل زیر محاسبه می‌شوند:

α: ضریب تبخیر ـ تعرّق که از معادله‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$\alpha=\overline{ET}/\overline{PE} \quad (۱۸)$$

که در آن $\overline{ET}$ متوسط ماهانه‌ی تبخیر ـ تعرّق حقیقی و $\overline{PE}$ میانگین مقدار تبخیر ـ تعرّق پتانسیل است. این ضریب در آب و هواهای مرطوب نزدیک به (۱) است، اما در نواحی بسیار خشک به صفر نزدیک می‌شود.

β، ضریب تجدید رطوبت با فرمول زیر به‌دست می‌آید

$$\beta=\frac{\overline{R}}{\overline{PR}} \quad (۱۹)$$

که در آن $\overline{R}$ متوسط افزایش رطوبت ماهانه و $\overline{PR}$، متوسط میزان پتانسیل افزایش رطوبت می‌باشد.

δ ضریب کاهش رطوبت که از رابطه‌ی مقابل به‌دست می‌آید.

$$\delta=\frac{\overline{L}}{\overline{PL}} \quad (۲۰)$$

که در آن $\overline{L}$ متوسط میزان کاهش رطوبت و $\overline{PL}$ متوسط میزان پتانسیل کاهش رطوبت می‌باشد.

که میزان پتانسیل رطوبت کاهش یافته مساوی میزان تبخیر ـ تعرّقی است، که اگر هیچ بارندگی در طول ماه اتفاق نیافتاده بود، رخ می‌داد.

γ، ضریب رواناب است و از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$\gamma=\frac{\overline{RO}}{\overline{S'}} \quad (۲۱)$$

که در آن $\overline{RO}$، متوسط رواناب و $\overline{S'}$ متوسط میزان رطوبت در اوّل ماه است:

جدول (۶) محاسبه‌ی بارندگی برآوردی، انحراف رطوبت و شدّت خشکسالی پالمر

YEAR	Month	^ET	^R	^RO	^L	^P	d	ABS(d)	Ḱi	Di *Ḱi	Ki	Z	XI
	Jan	0.23	1.45	0.02	0.01	1.69	-0.51	0.51	1.46	1.05	1.45	-0.73	-2.48
	Feb	0.67	1.63	0.12	0.00	2.41	-1.20	1.20	1.25	0.90	1.25	-1.50	-2.73
	Mar	1.55	1.26	0.44	0.08	3.16	-1.75	1.75	1.17	0.84	1.16	-2.03	-3.13
	Apr	2.22	0.13	0.17	0.26	2.26	0.15	0.15	1.37	0.99	1.36	0.21	-2.73
	May	1.92	0.00	0.03	0.85	1.10	0.48	0.48	1.40	1.01	1.39	0.67	-2.23
	Jun	1.65	0.00	0.00	1.12	0.53	-0.52	0.52	1.79	1.29	1.78	-0.93	-2.31
2003	Jul	0.98	0.00	0.00	0.56	0.42	-0.42	0.42	2.52	1.82	2.50	-1.06	-2.42
	Aug	0.30	0.00	0.00	0.13	0.17	-0.17	0.17	3.71	2.68	3.69	-0.63	-2.38
	Sep	0.19	0.00	0.00	0.04	0.15	-0.15	0.15	3.75	2.70	3.73	-0.57	-2.33
	Oct	0.52	0.01	0.00	0.01	0.52	-0.46	0.46	2.51	1.81	2.49	-1.16	-2.47
	Nov	0.32	0.14	0.00	0.24	0.22	1.63	1.63	2.04	1.47	2.03	3.30	-1.12
	Dec	0.19	0.77	0.00	0.00	0.96	-0.38	0.38	1.71	1.23	1.70	-0.64	-1.22

در جدول ۶، مقادیر $\hat{ET}$ ، $\hat{R}$ ، $\hat{RO}$ و $\hat{L}$ با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

- تبخیر ـ تعرّق برآوردی ماهانه $\hat{ET} = \alpha \times PE$

- تجدید رطوبت خاک برآوردی ماهانه $\hat{R} = \beta \times PR$

- رواناب برآوردی ماهانه $\hat{RO} = \gamma \times S'$

- اتلاف رطوبت خاک برآوردی ماهانه $\hat{L} = \delta \times PL$

سپس با محاسبه‌ی ضرایب α، β، γ، δ، PE، PR، $\overline{S'}$ ، PL و در نتیجه $\hat{P}$ محاسبه می‌شود:

در ستون بعدی جدول (۶) مقادیر d که میزان انحراف بارندگی برآوردی از بارندگی واقعی است، از رابطه‌ی مقابل به‌دست می‌آید

$$d = P - \hat{P} \quad (۲۲)$$

و سپس میانگین Di برای ماههای سال از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\overline{D}_i = \frac{\sum_{\text{all years}} |d_i|}{\#\text{ of years in record}} \quad (۲۳)$$

برای محاسبه‌ی عامل توزینی K منطقه، لازم است ابتدا K′ با رابطه‌ی زیر برای هر ماه معیّن شود

$$K_i = \frac{17.67}{\sum_{j-1}^{12} \overline{D}_j K_j^i} K_j^1 \quad (۲۴)$$

$$K_i^1 = 1.5.\log_{10}\left[\frac{\frac{\overline{PET}_i + \overline{R}_i + \overline{RO}_i}{\overline{P}_i + \overline{L}_i} + 2.5}{\overline{D}_i}\right] + 0.5 \quad (۲۵)$$

با محاسبه‌ی d و K تعیین شاخص انحراف رطوبت ماهانه‌ی پالمر (Z) با ضرب مقدار انحراف بارش (d) در عامل توزینی (K) در یک ماه معیّن امکان‌پذیر می‌شود(Z=Kd). عدد ثابت K، یک عامل توزینی است که از طریق تجربی به دست آمده و بستگی به تعداد اندازه‌گیری‌های رطوبت موجود و رطوبت مورد نیاز در اقلیم مورد نظر دارد. کاهش بارندگی از مقدار نرمال باعث کاهش مقدار Z و افزایش بارندگی باعث افزایش مقدار Z می‌شود و شاخص شدّت خشکسالی (Xi) به اعداد متوالی Z بستگی دارد و X3i که برای محاسبه‌ی شاخص شدّت خشکسالی پالمر در زمان وقوع خشکسالی است، با رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود

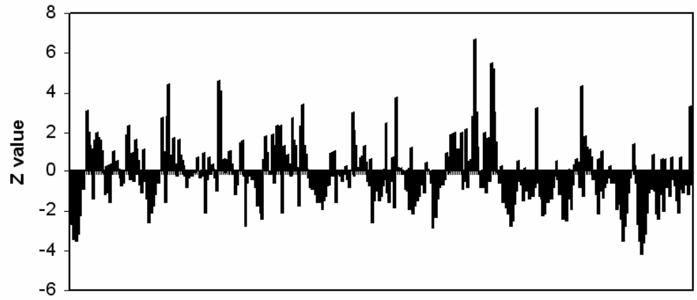
$$X_{3i} = 0.897X_{3i-1} + \left(\frac{1}{3}\right)Z_i \quad (۲۶)$$

در جدول (۶) مقادیر محاسبه شده پارامترهای بالا برای یک دوره‌ی آماری ۳۳ ساله‌ی مشهد، نشان داده شده است.

٤. بحث و نتیجه گیری

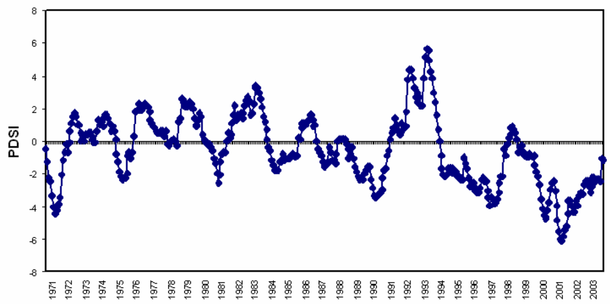
با اجرای برنامه‌ی محاسبه‌ی شاخص شدّت خشکسالی پالمر برای دوره‌ی آماری ۲۰۰۳-۱۹۷۱ میلادی مشهد، نمودار ماهانه‌ی شاخص انحراف رطوبت (Z) ترسیم گردیده که در شکل (۲) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که درجه‌ی انحراف رطوبت در مشهد بسیار زیاد است و دارای نظم خاصّی نیست و

برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری طولانی مدّت محتوی آب خاک،مانند کشت دیم، با ریسک زیادی همراه خواهد بود.



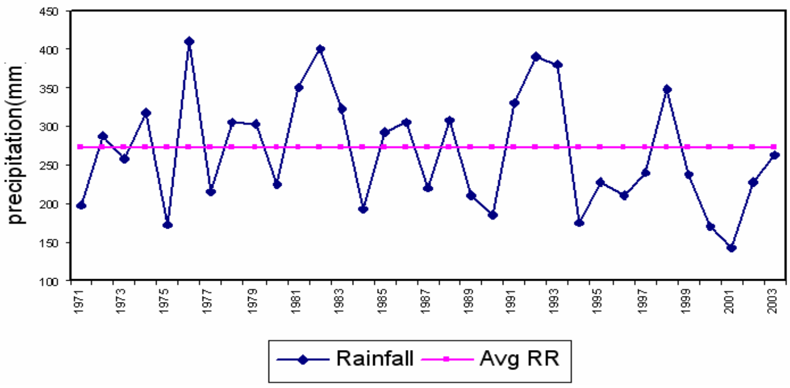
شکل (۲) نمودار انحراف رطوبت ماهانه طیّ دوره‌ی آماری ۲۰۰۳-۱۹۷۱

در شکل (۳) مقادیر ماهانه‌ی شاخص شدّت خشکسالی پالمر (PDSI) برای دوره‌ی آماری بالا در مشهد محاسبه و نشان داده شده است. وجود دوره‌های کوتاه‌مدّت و بلندمدّت خشکسالی در مشهد، طیّ این دوره، حاکی از اهمیت و ضرورت لحاظ نمودن این پدیده در مدیریت توسعه و بخصوص مدیریّت کشاورزی منطقه دارد. شدیدترین خشکسالی به وقوع پیوسته این دوره در سال ۲۰۰۱ میلادی و مطابق سال ۱۳۸۰ شمسی با مقدار(۶-) و در درجه‌ی "بسیار زیاد خشک" بوده و شدیدترین ترسالی در سال ۱۹۹۳ میلادی با مقدار (۵) و درجه‌ی "بسیار مرطوب" بوده است در ۳۳ سال اخیر (۸) نوبت خشکسالی حادث شده، که کوتاهترین آن دوازده ماه و طولانی‌ترین آنها شصت ماه دوام داشته است. در پایان سال ۲۰۰۳ میلادی، که معادل آذر و دی ۱۳۸۲ است، مقدار PDSI برابر با (۱/۲-) که با عبارت کمی خشک تعریف می‌شود و برای رسیدن به شرایط نرمال وقوع بارندگی بیش از میانگین در چند ماه پی در پی لازم است.



شکل (۳) محاسبه‌ی شاخص شدّت خشکسالی پالمر طیّ دوره‌ی آماری ۲۰۰۳-۱۹۷۱

برای مقایسه‌ی بهتر و اعتماد به محاسبات انجام شده، انحراف بارش از میانگین در نمودار (۴) نشان داده شده، با مقایسه‌ی شکل‌های (۳ و ۴) تأثیر کاهش بارندگی در شدّت و مدّت وقوع خشکسالی مشاهده می‌شود. به طور مشابه، می‌توان تمامی مراحل محاسباتی را برای دیگر نقاط استان خراسان تکرار نمود. برای این کار کافی است داده‌های ورودی با اطّلاعات جدید تعویض شود، البته نبود اطّلاعات دقیق مربوط به ظرفیّت زراعی و نقطه‌ی پژمردگی در خاک‌های مناطق مختلف ایران، از جمله کمبودهای کاربرد این الگو است.



شکل (۴) بارندگی سالانه و انحراف از میانگین در دوره‌ی آماری ۲۰۰۳–۱۹۷۱

از آن‌جاکه در محاسبه‌ی شاخص شدّت خشکسالی پالمر از روابط تبخیر– تعرّق و معادله‌ی بیلان آب تورنت وایت استفاده می‌شود و با توجه به این‌که در مناطقی مشابه با اقلیم مشهد محاسبه انجام شده به وسیله‌ی این روش دارای دقّت مطلوب نیست و مقادیر تبخیر ـ تعرّق در مقایسه با دیگر روش‌ها کمتر برآورد می‌شود، لذا لازم است برای محاسبه‌ی بیلان آبی از روش‌های دیگری، مانند هارگریوز، استفاده شود. البته ذکر این نکته ضروری است که چنانچه از الگوی پالمر تنها به منظور پایش خشکسالی استفاده شود، نوع روابط محاسبه‌ی تبخیر ـ تعرّق در خروجی نهایی چندان مؤثّر نخواهد بود، زیرا در الگوی پالمر انحرافات رطوبت و محتوی آب خاک از نرمال‌های محلّی، مبنای محاسبه قرار می‌گیرد. به منظور دقّت بیشتر در محاسبات شاخص شدّت خشکسالی پالمر، دو پارامتر Pe و WPLM نیز محاسبه می‌شود. Pe احتمال پایان دوره‌ی جاری[1] و WPLM

1. Probability of the current spell ending

شاخص شدّت خشکسالی پالمر وزنی[1] است که محاسبه‌ی این پارامترها در برنامه‌ی آتی مطالعات خشکسالی می‌باشد.

منابع و مآخذ:

۱. آسیایی، مهدی و همکاران(۱۳۸۴)، *مدیریت ریسک خشکسالی (شناخت و راهکارها)*، چاپ اول، انتشارات، سخن گستر، مشهد.

۲. ـــــــــ (۱۳۸۴) *بررسی اثرات اقتصادی بلیه خشکسالی در شهرستانهای استان خراسان*، سازمان هواشناسی کشور ،پژوهشکده‌ی اقلیم شناسی.

۳. ـــــــــ (۱۳۸۵) *شاخص های خشکسالی*.چاپ اول، انتشارات سخن گستر، مشهد.

۴. ـــــــــ (۱۳۸۳) *فرهنگ اصطلاحات هواشناسی و اقلیم شناسی*،چاپ اول، انتشارات سخن گستر ،مشهد.

۵. جوانمرد، سهیلا، (۱۳۸۰)، *بررسی شاخص های خشکسالی و استاندارد نمودن آن برای مناطق مختلف کشور*، گزارش نهایی طرح ملّی توتک، سازمان هواشناسی کشور ،پژوهشکده‌ی اقلیم‌شناسی.

6. Guttman, N. B.(1991), *A Sensitivity Analysis of the palmer Hydrologic Drought Index*, Water Resources Bulletin 27:767-807.

7. Kogan, F. N. (1995).*Droughts of the Late 1980's in the United Data*, Bulletin of the American Meteorological Society, 76: 655-68.

8. Miller, D. E, & C. R., Hays,(1994). *Missouri Drought Response Plan*. Water Resource Report, No. 44.

9. Palmer, W. C,(1965).*Meteorological Drought* Research paper, No. 45, U. S. weather Bureau. Washington, D. C. Feb., 58p.

10. Thornthwaite,(1955). C. W. & J. R. Mather, *The water budget and its use in irrigation*, Water-rear book of Agriculture 1955, Washington, DC: US Dept. of Agriculture, PP. 346-58.

11. Wilhite, D. A. (2000), *Drought a Global Assessment*, Vol. I.

1. The Weighted PDSI